doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.07.019

水培生菜低损采收柔性抓取参数视觉检测方法

马义东[1]　冯腾潇[1]　金　鑫[1]　刘国维[2]　李心平[1]　齐　翀[1]
(1.河南科技大学农业装备工程学院,洛阳 471003;2.珠海益品农业科技有限公司,珠海 519000)

摘要:水培生菜是植物工厂主要栽培作物,菜叶柔嫩且分散交错,机械采收易出现菜叶损伤等问题。本文提出水培生菜叶展及叶面交错点视觉检测方法,并用于生菜柔性抓取参数调控。开展了基于水培生菜边缘轮廓提取的叶展视觉检测方法研究,实现相邻水培生菜重叠状态下叶展视觉检测。为提升水培生菜叶面交错点识别效果,分析了 YOLO v5s、YOLO v5s-SimAM、YOLO v5s-SENet、YOLO v5s-CA 对叶面交错点识别准确率等参数的影响,并结合生菜叶展检测结果筛选叶面交错点,获取生菜柔性抓取角度。结果表明:水培生菜叶展视觉检测相对误差平均值为 2.46%;YOLO v5-CA 模型对叶面交错点视觉识别效果最佳,识别准确率为 94.1%,召回率为 91.0%,平均精度均值为 93.8%。在水培生菜特征视觉检测基础上,开展了采收验证试验并利用高速摄影进行分析,试验结果表明,采收成功率为 97.23%,采收损伤程度为 4.08%,实现了水培生菜低损伤柔性采收。

关键词:植物工厂;水培生菜;视觉检测;深度学习;低损采收
中图分类号:S225.92　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2025)07-0210-09　　**OSID**:

Visual Detection Method of Flexible Grasping Parameters for Hydroponic Lettuce Low-damage Harvesting

MA Yidong[1]　FENG Tengxiao[1]　JIN Xin[1]　LIU Guowei[2]　LI Xinping[1]　QI Chong[1]
(1. *College of Agricultural Equipment Engineering*, *Henan University of Science and Technology*, *Luoyang* 471003, *China*
2. *Eponic Agriculture Co.*, *Ltd.*, *Zhuhai* 519000, *China*)

Abstract: Hydroponic lettuce is the main crop in plant factories. However, mechanical harvesting currently causes serious leaf damage. The key problem of low-damage harvesting in plant factories was solved. A visual detection method for lettuce leaf expansion and overlapping points to control flexible grasping parameters was proposed, thereby improving harvesting quality. A vision-based leaf expansion detection method was carefully tested that used edge contour extraction to accurately measure leaf expansion, even when adjacent lettuce plants overlapped. The results were used to adjust flexible gripper diameters precisely. To optimize overlapping point recognition, comprehensive experiments were conducted by comparing YOLO v5s, YOLO v5s-SimAM, YOLO v5s-SENET, and YOLO v5s-CA models, with detailed analysis of their respective impacts on recognition accuracy parameters. Subsequently, based on the leaf expansion detection results, optimal overlapping points were screened. The positional information of these selected overlapping points was then used to calculate the most appropriate grasping angles for the robotic manipulator. Experimental results demonstrated that the visual detection system achieved an average relative error of merely 2.46% for leaf expansion measurement. Moreover, the YOLO v5s-CA model delivered superior performance in overlapping point recognition with 94.1% accuracy, 91.0% recall, and 93.8% mAP. Subsequent harvesting validation tests confirmed the effectiveness of this method, attaining a remarkable 97.23% success rate while maintaining minimal damage at just 4.08%, ultimately realizing high-quality, low-damage flexible harvesting of hydroponic lettuce.

Key words: plant factory; hydroponic lettuce; visual detection; deep learning; low-damage harvesting

收稿日期:2025-05-06　修回日期:2025-05-18
基金项目:河南省科技攻关项目(252102111178)和国家自然科学基金项目(52105252)
作者简介:马义东(1991—),男,副教授,博士,主要从事设施园艺智能采收装备研究,E-mail:mayidong90@163.com
通信作者:金鑫(1986—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农机装备研究,E-mail:jx.771@163.com

0　引言

水培生菜是植物工厂主要栽培作物[1-3]，目前仍依赖人工采收，费时费力。水培生菜菜叶柔嫩且分散交错，机械采收易出现菜叶损伤等问题，影响销售品质，严重制约采收装备推广应用。采用图像处理、深度学习等机器视觉技术检测水培生菜形貌特征参数，进而智能调控采收装备作业参数，是提升采收质量的有效途径[4-6]。

随着植物工厂水培生菜产业规模增大，采收装备需求逐年增多。日本等国家采收装备的研发起步较早，主要采用圆盘刀切除根茎等方式[7-9]，采收后的生菜多以分散的菜叶进行销售，采收效率高，但不适用于我国水培生菜种植农艺特征和整株销售要求。为满足不切散菜叶的销售要求，我国水培生菜采收多采用刚性材料聚拢菜叶，进而切除根茎的方法[10-14]，有效保障了整株采收，但菜叶聚拢过程易造成损伤，影响生菜品质。为此，团队前期提出水培生菜柔性低损采收方法，通过 4 根柔性手指从生菜顶部抓取菜叶的方式降低采收损伤，并研究抓取部位、抓取参数对菜叶损伤的影响[15-17]。

目前，YOLO 等深度学习模型已在叶菜特征视觉检测及作业装备智能调控等领域广泛应用[18-25]，且算法模型更新迭代迅速，为水培生菜形貌特征视觉检测提供了坚实基础。杨意等[19]利用实例分割模型 Mask3D 处理群体生菜点云数据，实现了密植生菜点云有效分割与鲜质量预测，但点云数据处理耗时长，并不适宜生菜采收实时检测。陆声链等[24]提出一种基于 RGB－D 数据融合的生菜表型检测方法，实现了不同品种生菜冠幅、叶面积、株高等形貌参数的精准检测，研究对象为单株生菜。宋彦等[25]提出一种基于多头自注意力机制和多尺度特征融合的 RMHSA－NeXt 算法，实现茶叶采摘点精确感知。上述研究为水培生菜形貌特征视觉检测提供了良好的研究思路。

在前期植物工厂水培生菜柔性采收装备研究基础上，本文提出基于水培生菜边缘轮廓提取的叶展视觉检测方法，改进优化 YOLO v5s 模型结构以提升叶面交错点识别效果，基于提出的柔性抓取参数视觉检测方法，开展水培生菜采收验证试验，以期为植物工厂水培生菜低损伤智能采收装备研发及应用提供参考。

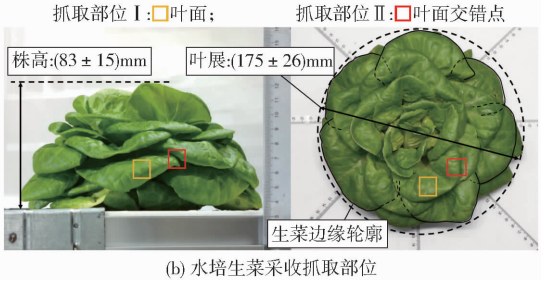
1　材料与方法

1.1　农艺物理特征

研究对象为植物工厂广泛栽培的水培奶油生菜，如图 1 所示。植物工厂内水培生菜的行距株距等种植农艺规范（图 1a），为采收装备作业提供了有利条件，但水培生菜菜叶柔嫩且分散交错，采收过程易出现损伤。前期研究发现生菜采收部位选取直接影响菜叶损伤，采收过程中抓取叶面交错点相较于抓取叶面（图 1b），可有效降低水培生菜采收损伤[16]。



(a) 植物工厂水培生菜



(b) 水培生菜采收抓取部位

图 1　植物工厂水培生菜农艺物理特征

Fig. 1　Agronomic and physical characteristics of hydroponic lettuce in plant factory

1.2　基于水培生菜视觉检测的柔性采收流程

图 2 为水培生菜柔性采收系统示意图，主要包括图像采集相机、柔性抓取机构（含 4 根柔性手指，呈 90°分布）、根茎切除机构、定植板输送机构等。水培生菜定植板输送至图像采集位置后，分别采集生菜侧视和俯视图像；通过侧视图像检测各水培生菜株高[17]，进而调控柔性抓取高度；通过俯视图像，检测各生菜叶展以调节柔性抓取直径，并检测叶面交错点以调节柔性抓取角度。视觉检测过程在上位机 PC 端进行，进而通过 RS485 通信接口将柔性抓取参数视觉检测结果发送至下位机 PLC，最终实现柔性抓取直径、角度、高度等参数调节。

图 3 为水培生菜叶展和叶面交错点视觉检测流程。采集水培生菜俯视图像后，通过阈值分割等图像处理方法，提取各生菜边缘轮廓并拟合，实现相邻水培生菜重叠状态下各叶展 D_i 检测，为生菜抓取直径 d_i 调节提供基础；利用深度学习方法检测生菜叶面交错点，并结合生菜抓取直径 d_i，筛选抓取范围内叶面交错点，为生菜柔性抓取角 θ_i 的调节提供基础。

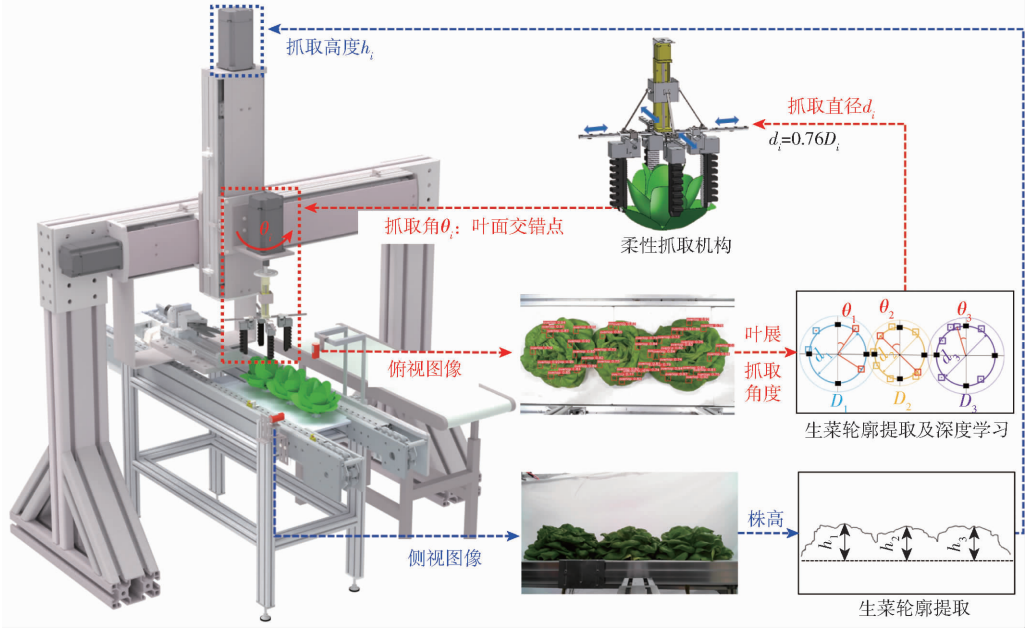


图 2 水培生菜柔性采收系统示意图

Fig. 2 Schematic of flexible harvesting system for hydroponic lettuce

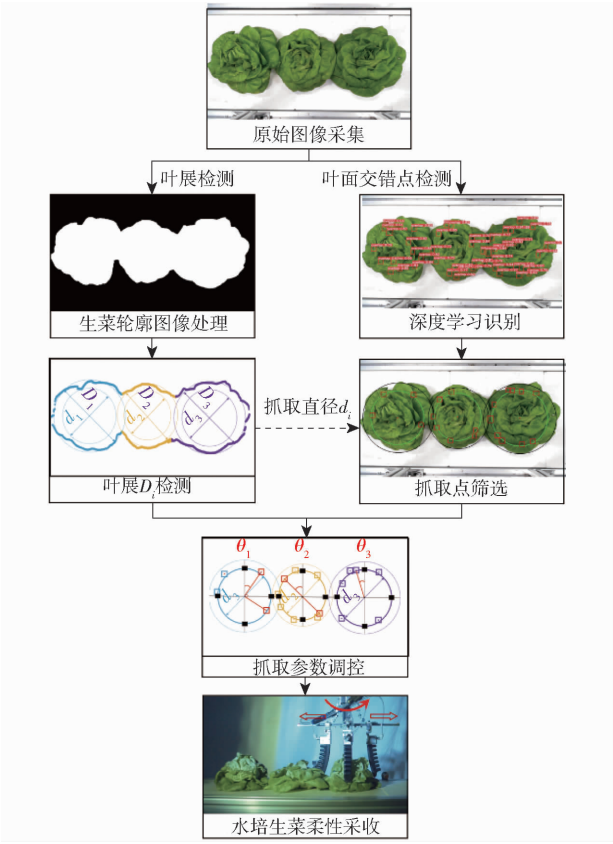


图 3 水培生菜叶展及叶面交错点视觉检测流程

Fig. 3 Visual detection process of leaf expansion and leaf overlapping points in hydroponic lettuce

根据水培生菜视觉检测结果，调整柔性抓取直径 d_i、抓取角 θ_i后，柔性抓取机构执行后续生菜拔取等采收作业。

1.3 相邻生菜重叠状态下叶展视觉检测方法

相邻水培生菜菜叶重叠，影响生菜叶展视觉检测。为此，本文综合采用图像预处理、生菜边缘轮廓提取、生菜边缘轮廓拟合等方法，检测各生菜叶展，为生菜抓取直径调节、叶面交错点筛选等提供基础。水培生菜叶展视觉检测共采集 25 幅俯视图像，为模拟植物工厂水培生菜连续采收的场景，每幅图像含 3 株水培生菜（相邻生菜菜叶均重叠）。

1.3.1 图像预处理

图 4 为水培生菜俯视图像预处理案例。为降低图像背景干扰，根据水培生菜颜色特征，将原始 RGB 图像（图 4a）转换为只含水培生菜灰度图像（图 4b），并作为图像前景；再利用 OTSU 阈值分割、孔洞填充等方法获取水培生菜二值化图像（图 4c），为生菜边缘轮廓提取及拟合提供基础。

1.3.2 水培生菜边缘轮廓提取及拟合

在图像预处理基础上，提取并拟合水培生菜边缘轮廓（图 5），进而求解各生菜叶展，主要过程包括：①将预处理图像（图 4c）转换为尺寸 1 920 像素 ×1 080 像素，并建立直角坐标系。②沿 Y 轴正负方向，逐列扫描像素值 255 首次出现的像素点，并记录其坐标，获取水培生菜边缘轮廓的坐标数据集。③根据生菜边缘轮廓的坐标数据集，采用最小二乘法，拟合生菜边缘轮廓，求解拟合圆直径 X_i，获取各生菜叶展 D_i为

$$D_i = KX_i \tag{1}$$

式中 K——图像像素比例因子，取 0.27 mm/像素

1.4 基于改进 YOLO v5s 的叶面交错点识别

为提升水培生菜叶面交错点识别效果，改进 YOLO v5s 网络结构并试验验证，为水培生菜柔性抓取角度调节提供基础。



(a) 原始图像



(b) 前景图像



(c) 二值化图像

图 4　图像预处理

Fig. 4　Image preprocessing

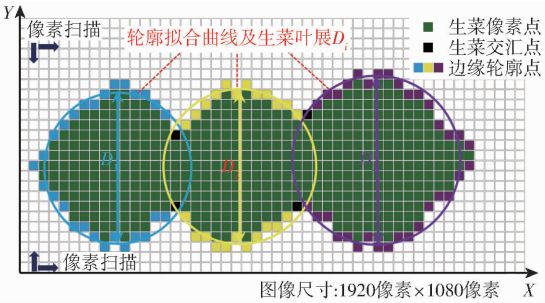


图 5　水培生菜边缘轮廓提取及拟合

Fig. 5　Edge contour extraction and fitting

1.4.1　数据集构建

利用 Microsoft Lifecam 彩色相机，在黑箱人工光源条件下，采集单株水培生菜图像（1 920 像素 × 1 080 像素），构建数据集，共 1 800 幅，并按比例 8∶1∶1划分为训练集、测试集和验证集。采用 LabelImg 图像标注工具对水培生菜叶面交错点进行标注，如图 6 所示。

1.4.2　YOLO v5s 网络结构改进

图 7 为水培生菜叶面交错点识别网络结构。为提升水培生菜叶面交错点识别精度，在 YOLO v5s 网络结构中分别引入 SimAM（Simple parameter-free attention module）、SENet（Squeeze-and-Excitation

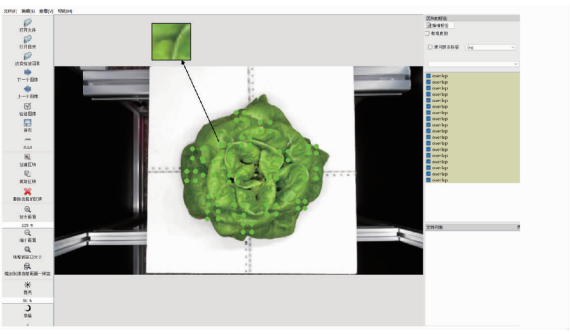


图 6　水培生菜叶面交错点标注

Fig. 6　Annotation of leaf overlapping points in hydroponic lettuce

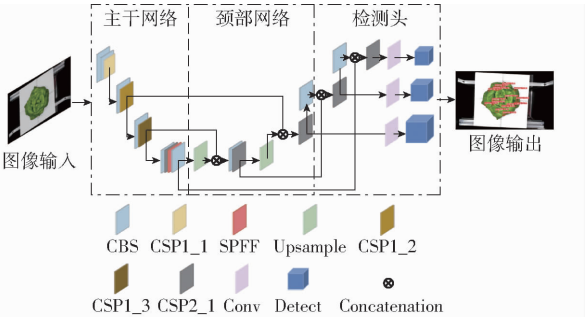


图 7　水培生菜叶面交错点识别网络结构

Fig. 7　Network architecture for leaf overlapping points recognition in hydroponic lettuce

network）和 CA（Coordinate attention）3 类注意力机制模块并试验验证。为增强 YOLO v5s 模型对叶面交错点关键特征的提取能力，引入 SimAM 无参注意力模块；为强化叶面交错点判别性特征表达，通过 SENet 模块引入通道注意力机制；叶面交错点目标较小，易出现特征丢失，为此引入 CA 模块，将特征图位置信息添加到通道注意力模型。

在上述网络结构改进的基础上，试验验证 YOLO v5s、YOLO v5s－SimAM、YOLO v5s－SENet 和 YOLO v5s－CA 网络结构对叶面交错点的识别效果。试验平台配置英特尔 E5－2680 v2 处理器（32 GB 运行内存）和英伟达 GeForce GTX3060 显卡；为优化 GPU 计算效率，采用 PyTorch－1.13.1（CUDA 11.7）开展模型训练与推理。模型训练采用小批量梯度下降法，批量设置为 32，共 300 个训练周期；优化器初始学习率设置为 0.01，权重衰减系数 λ 设置为 0.000 5。

选取准确率（Precision，P），召回率（Recall，R）和平均精度均值（mean average precision，mAP）作为叶面交错点识别效果评价指标。

1.4.3　叶面交错点筛选及柔性手指抓取角度

在叶面交错点识别基础上，结合水培生菜叶展 D_i 视觉检测，筛选可供柔性手指抓取叶面交错点，如图 8 所示。根据前期研究结果，水培生菜柔性抓取

直径 d_i 设为 $0.76D_i$[15]，结合柔性手指宽度及预试验，叶面交错点筛选范围设置为水培生菜圆周方向 $(0.74\sim0.78)D_i$。

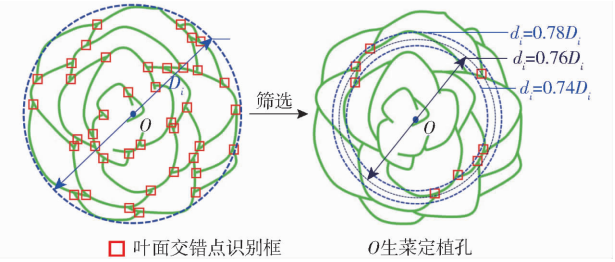


图 8 水培生菜叶面交错点筛选方法

Fig. 8 Screening method for leaf overlapping points in hydroponic lettuce

在水培生菜叶面交错点筛选基础上，计算柔性手指抓取角度，如图 9 所示。图中 k_i 为叶面交错点斜率，θ_i 为柔性手指抓取角，(x_i, y_i) 为识别框中心点坐标。由于 4 根柔性手指呈 90°分布，为使柔性手指尽量多的抓取叶面交错点，将叶面交错点分为垂直组和共线组。判断叶面交错点位置关系后，计算柔性手指抓取角。

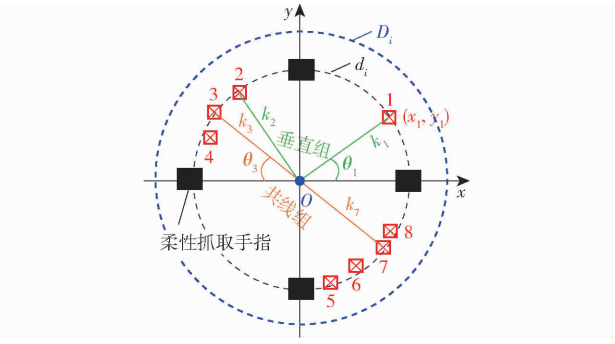


图 9 柔性手指抓取角度

Fig. 9 Grasping angles of flexible fingers

叶面交错点位置关系判别及柔性手指抓取角度计算过程如下：

(1)以水培生菜定值孔 O 为圆心，结合 4 根柔性手指初始位置，建立直角坐标系；根据叶面交错点识别框中心点坐标 (x_i, y_i)，计算各叶面交错点斜率 k_i 为

$$k_i = y_i / x_i \tag{2}$$

(2)根据叶面交错点斜率 k_i，判断叶面交错点位置关系。叶面交错点垂直组判别准则为

$$k_i = -\frac{1}{k_{i+n}} \tag{3}$$

叶面交错点共线组判别准则为

$$k_i = k_{i+n} \tag{4}$$

(3)在判别叶面交错点垂直组或共线组的基础上，计算水培生菜柔性抓取角 θ_i 为

$$\theta_i = \min\{\arctan k_i, \arctan k_{i+n}\} \tag{5}$$

2 结果与分析

2.1 水培生菜叶展视觉检测结果

图 10 为水培生菜边缘轮廓拟合及叶展检测效果，在提出的图像预处理基础上，完成了水培生菜边缘轮廓提取及拟合(图 10a)，实现了相邻水培生菜重叠状态下各叶展 D_i 检测(图 10b)，可为水培生菜柔性抓取直径 d_i 调控提供基础。

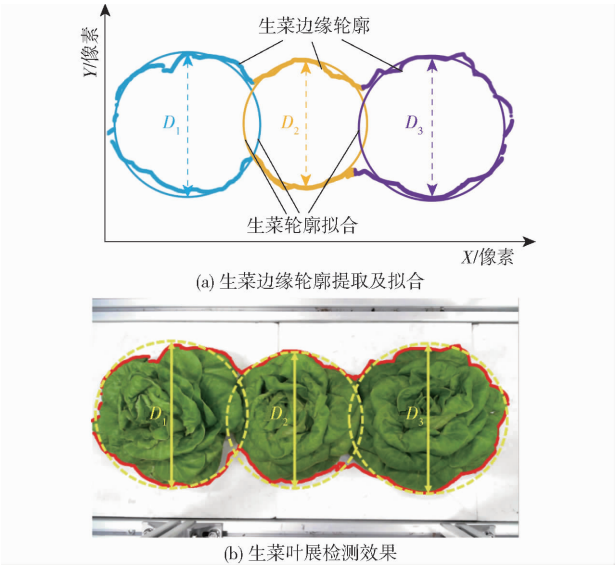


图 10 水培生菜边缘轮廓拟合及叶展检测案例

Fig. 10 Case of edge contour fitting and leaf expansion detection in hydroponic lettuce

图 11 为 25 幅图像(每幅图像含 3 株生菜)中叶展视觉检测值与手动测量值线性回归结果，线性回归方程 R^2 为 0.82～0.89，RMSE 为 3.78～5.10 mm。左侧生菜和右侧生菜 RMSE 低于中间生菜 RMSE，表明两侧生菜叶展视觉检测值相较于中间生菜，更接近于手动测量值。

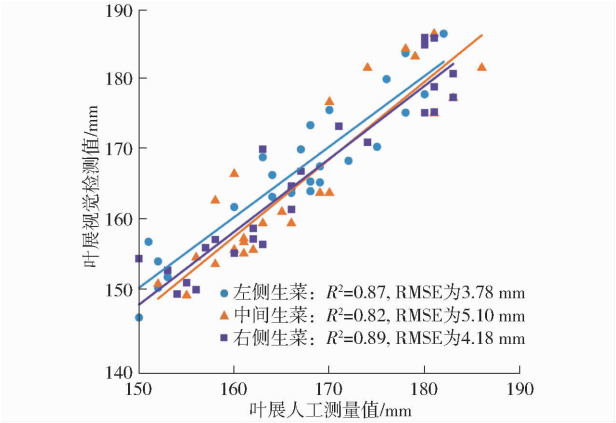


图 11 水培生菜叶展视觉检测结果

Fig. 11 Visual detection results of leaf expansion in hydroponic lettuce

图 12 为水培生菜叶展视觉检测相对误差，最大值为 4.28%，最小值为 0.18%，平均值为 2.46%。

中间生菜叶展视觉检测相对误差平均值为 3.06%，高于左侧生菜(1.99%)和右侧生菜(2.32%)。结合图 11 所示中间生菜叶展检测的 RMSE 最大，表明中间生菜的叶展视觉检测效果最差，这是由于中间生菜部分菜叶被两侧生菜遮挡(中间生菜边缘轮廓的拟合数据减少)所造成。

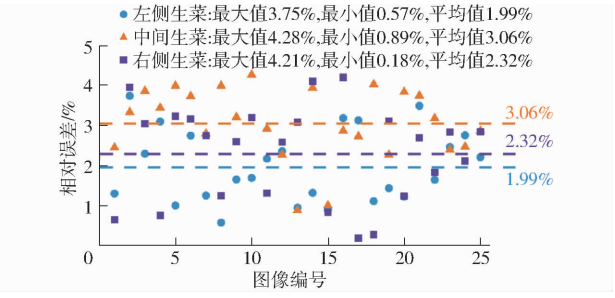


图 12　水培生菜叶展视觉检测相对误差

Fig. 12　Relative error of visual detection for leaf expansion in hydroponic lettuce

2.2　叶面交错点识别结果

表 1 为采用 YOLO v5s 及 3 种改进模型识别叶面交错点试验结果。YOLO v5s－CA 模型对叶面交错点识别准确率 P 为 94.1%、召回率 R 为 91.0%、平均精度均值 mAP 为 93.8%，相较 YOLO v5s、YOLO v5s－SimAM、YOLO v5s－SENet 模型的识别效果有所提升；表明在 YOLO v5s 模型的主干网络中引入 CA 注意力机制，有助于提升叶面交错点的识别精度。YOLO v5s－SimAM 和 YOLO v5s－SENet 模型的识别效果低于原始 YOLO v5s 模型，表明叶面交错点识别并不适宜引入 SimAM 和 SENet 模块。YOLO v5s－CA 模型的推理时间(15.6 ms)比其他模型长，但叶面交错点识别准确率等性能参数优于其他模型，因此选取 YOLO v5s－CA 模型用于水培生菜叶面交点识别。

表 1　叶面交错点识别结果

Tab. 1　Recognition results of leaf overlapping points

模型	P/%	R/%	mAP/%	推理时间/ms
YOLO v5s	93.8	90.7	93.6	11.2
YOLO v5s－SimAM	92.9	89.9	93.0	11.7
YOLO v5s－SENet	92.9	88.8	92.5	12.2
YOLO v5s－CA	94.1	91.0	93.8	15.6

水培生菜柔性抓取参数调控还需结合叶面交错点识别框的坐标信息，因此对叶面交错点识别的边界框损失(Box-loss)进行分析，如图 13 所示。随着训练轮数增加，各模型边界框损失急速线性减小，训练超 250 轮以后，各模型边界框损失趋于稳定，其中 YOLO v5s 和 YOLO v5s－CA 模型的边界框损失基本接近，且低于 YOLO v5s－SimAM 和 YOLO v5s－SENet 的边界框损失。以上结果表明，YOLO v5s 和 YOLO v5s－CA 模型检测效果，更有利于后续依据叶面交错点识别框坐标信息定位生菜柔性抓取部位。

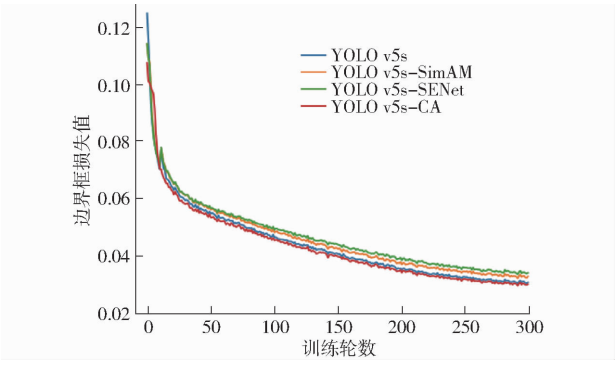


图 13　边界框损失曲线

Fig. 13　Bounding box loss curves

综合表 1 和图 13，最终选取 YOLO v5s－CA 用于水培生菜叶面交错点的识别。图 14 为 YOLO v5s 和 YOLO v5s－CA 识别水培生菜叶面交错点的案例，图 14b 为 YOLO v5s－CA 模型对叶面交错点的识别效果，明显优于原始 YOLO v5s 模型(图 14a)。

2.3　采收验证试验

设计水培生菜采收试验装置，如图 15 所示。在提出的水培生菜柔性抓取参数视觉检测基础上，调

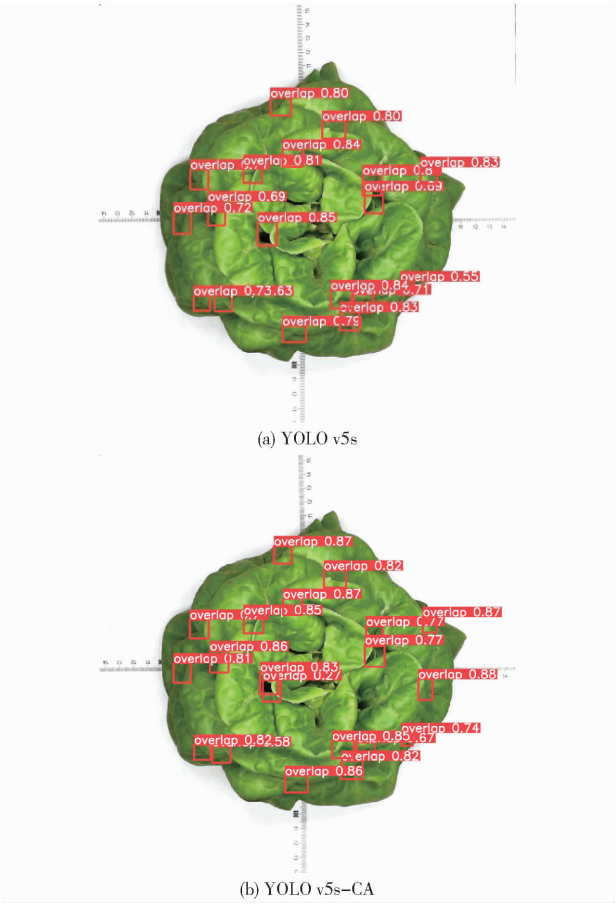


图 14　叶面交错点识别效果

Fig. 14　Detection effectiveness of leaf overlapping points recognition

控生菜柔性抓取直径、抓取角度等参数，并验证水培生菜采收成功率及采收损伤程度。水培生菜采收成功的判别标准为柔性手指成功抓取生菜，并完成生菜拔取、根茎切除、横移收集等采收作业。根据 T/CAAMM 292—2023《植物工厂 叶菜采收机器人》团体标准中采收损伤程度测量方法（单株生菜中损伤菜叶质量占该株生菜总质量百分比），测量各株生菜采收损伤程度。采收验证试验共使用 150 株水培生菜（50 组，3 株/组）。

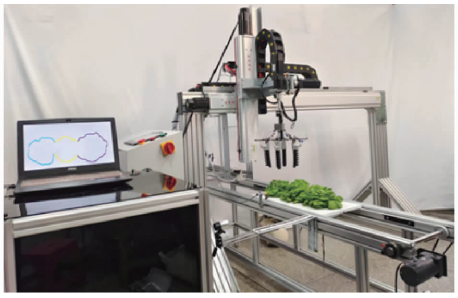
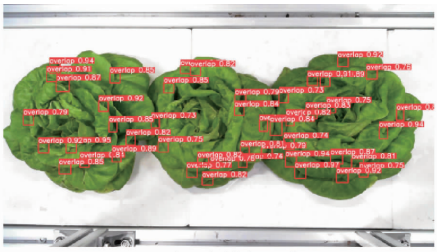


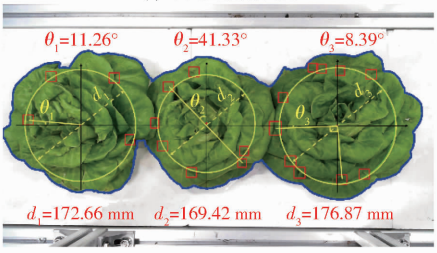
图 15 水培生菜采收试验装置

Fig. 15 Experimental device for hydroponic lettuce harvesting

图 16 为 50 组采收验证试验中，水培生菜圆周方向抓取参数（抓取直径、抓取角度）视觉检测案例。利用本文所提出的水培生菜叶展及叶面交错点视觉检测方法，获取了柔性手指的抓取直径 d_i 及抓取角 θ_i，实现了生菜圆周方向抓取参数的视觉伺服控制。



(a) 叶面交错点识别



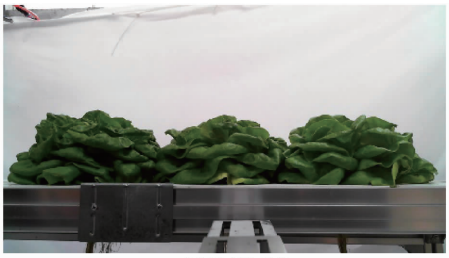
(b) 柔性抓取直径及角度计算

图 16 圆周抓取参数视觉检测案例

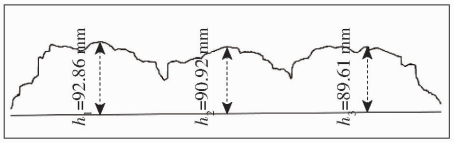
Fig. 16 Case of visual detection for circular grasping parameters

图 17 为采用阈值分割方法处理水培生菜侧视图像[17]，获取各生菜株高 h_i，采收验证试验中生菜柔性抓取高度设置为 $0.55h_i$[15]。

利用 Memrecam HX－5 型高速摄影机（拍摄频率 400 f/s）记录生菜抓取参数调控采收过程（图 18）。



(a) 侧视图像采集



(b) 生菜株高视觉检测效果

图 17 水培生菜株高视觉检测案例

Fig. 17 Case of visual detection for plant height in hydroponic lettuce

在水培生菜柔性抓取直径 d_i 和柔性抓取角 θ_i 调控基础上（图 18a），调控生菜抓取高度 H_i（图 18b），进而完成左、中、右 3 株水培生菜的拔取、根茎切除等柔性采收作业（图 18c）。

水培生菜采收验证试验结果如表 2 所示，采收成功率为 97.23%，标准差为 2.12%，变异系数为 2.18%；采收损伤程度为 4.08%，标准差为 0.62%，变异系数为 15.20%；实现了植物工厂水培生菜低损伤柔性采收。

表 2 采收验证试验结果

Tab. 2 Results of harvesting verification experiments %

指标	平均值	标准差	变异系数
采收成功率	97.23	2.12	2.18
采收损伤程度	4.08	0.62	15.20

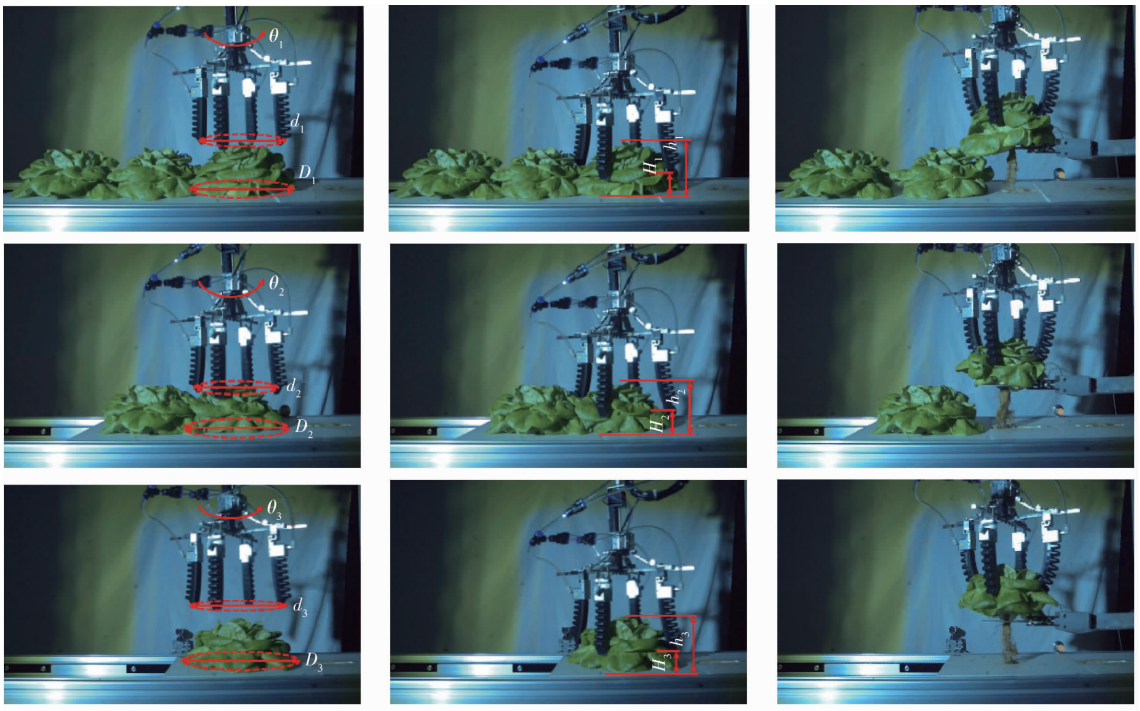
3 结论

（1）面向水培生菜低损伤采收需求，提出一种水培生菜叶展及叶面交错点视觉检测方法，用于调控生菜柔性抓取参数，提升了采收质量。

（2）提出基于水培生菜边缘轮廓提取的叶展视觉检测方法，相邻生菜重叠状态下叶展视觉检测相对误差最大值为 4.28%、最小值为 0.18%、平均值为 2.46%，为水培生菜抓取直径调节提供了基础。

（3）为提升水培生菜叶面交错点识别效果，改进了 YOLO v5s 模型结构，YOLO v5－CA 模型对叶面交错点的识别效果最佳，识别准确率为 94.1%、召回率为 91.0%、平均精度均值为 93.8%，为水培生菜抓取角度调控提供了基础。

（4）在水培生菜柔性抓取参数视觉检测基础上，开展了采收验证试验，采收成功率为 97.23%，



(a) 抓取直径及角度调节　　(b) 抓取高度调节　　(c) 生菜拔取及切茎

图 18　水培生菜柔性采收高速摄影案例

Fig. 18　High-speed photography case of flexible harvesting for hydroponic lettuce

采收损伤程度为 4.08%，实现了水培生菜低损伤柔　　性采收。

参　考　文　献

[1] 杨其长，魏灵玲，刘文科，等. 植物工厂系统与实践[M]. 北京：化学工业出版社，2023.

[2] 李宗耕,杨其长,沙德剑,等. 植物工厂水培叶菜生产全程机械化研究进展[J]. 中国农业大学学报,2022,27(5)：12－21.
LI Zonggeng, YANG Qichang, SHA Dejian, et al. Research progress on the full mechanization production of hydroponic leafy vegetables in plant factory[J]. Journal of China Agricultural University, 2022, 27(5): 12－21. (in Chinese)

[3] CENGIZ K. Intelligent environmental control in plant factories: integrating sensors, automation, and AI for optimal crop production[J]. Food and Energy Security, 2025, 14(1): 2－17.

[4] 刘成良，贡亮，苑进，等 农业机器人关键技术研究现状与发展趋势[J]. 农业机械学报，2022，53(7)：1－22,55.
LIU Chengliang, GONG Liang, YUAN Jin, et al. Current status and development trends of agricultural robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(7): 1－22,55. (in Chinese)

[5] 苑进. 选择性收获机器人技术研究进展与分析[J]. 农业机械学报，2020，51(9)：1－17.
YUAN Jin. Research progress analysis of robotics selective harvesting technologies[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(9): 1－17. (in Chinese)

[6] 刘继展，江应星. 农业采摘机器人产业化进程分析与多臂高速化技术走向[J]. 农业机械学报，2024，55(10)：1－17.
LIU Jizhan, JIANG Yingxing. Industrialization trends and multi-arm technology direction of harvesting robots[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(10): 1－17. (in Chinese)

[7] CHO S I, CHANG S J, KIM Y Y, et al. AE—automation and emerging technologies: development of a three-degrees-of-freedom robot for harvesting lettuce using machine vision and fuzzy logic control[J]. Biosystems Engineering, 2002, 82(2): 143－149.

[8] BIRRELL S, HUGHES J, CAI J, et al. A field-tested robotic harvesting system for iceberg lettuce[J]. Journal of Field Robotics, 2020, 37(2): 225－245.

[9] ESHKABILOV S, LEE A, SUN Xin, et al. Hyperspectral imaging techniques for rapid detection of nutrient content of hydroponically grown lettuce cultivars[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 181(2): 105968.

[10] 高国华，王凯，苑严伟，等. 基于能量平衡的设施蔬菜收获机拉拔切割过程力学特性分析[J]. 农业工程学报，2017，33(24)：58－64.
GAO Guohua, WANG Kai, YUAN Yanwei, et al. Mechanical characteristic analysis of drawing and cutting process for greenhouse vegetable harvester based on energy balance theory[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(24): 58－64. (in Chinese)

[11] 徐赛超,毛罕平,刘洋,等. 植物工厂生菜采收末端执行机构设计与试验[J]. 农机化研究,2018，40(9)：172－176.
XU Saichao, MAO Hanping, LIU Yang, et al. Design and test of end effector for lettuce harvest in plant factory[J]. Journal

of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(9): 172 – 176. (in Chinese)

[12] 席志君, 龚康鑫, 贾冬冬, 等. 立体错位水培生菜自动收获装置设计与试验[J]. 中国农机化学报, 2024, 45(9): 34 – 41.
XI Zhijun, GONG Kangxin, JIA Dongdong, et al. Design and experiment of automatic harvesting device for hydroponic lettuce with three-dimensional dislocation[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization, 2024, 45(9): 34 – 41. (in Chinese)

[13] 曾百功, 黎奎良, 叶进, 等. 工厂化上海青流水线收割装置的设计与试验[J]. 吉林大学学报(工学版), 2022, 52(11): 2756 – 2764.
ZENG Baigong, LI Kuiliang, YE Jin, et al. Design and experiment of harvesting device for industrialized production line of Shanghaiqing[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2022, 52(11): 2756 – 2764. (in Chinese)

[14] 马义东,徐灿,崔永杰,等. 水培生菜整株低损收获装置设计与试验[J]. 农业机械学报,2019,50(1):162 – 169.
MA Yidong, XU Can, CUI Yongjie, et al. Design and test of harvester for whole hydroponic lettuce with low damage[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(1):162 – 169. (in Chinese)

[15] 马义东, 胡鹏展, 金鑫, 等. 水培生菜低损柔性采收装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 175 – 183, 210.
MA Yidong, HU Pengzhan, JIN Xin, et al. Design and experiment of low damage flexible harvesting device for hydroponic lettuce[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 175 – 183, 210. (in Chinese)

[16] MA Yidong, HU Pengzhan, LI Xinping, et al. Effects of harvesting grabbing type on grabbing force and leaf injury of lettuce [J]. Sensors, 2023, 23: 6047.

[17] MA Yidong, ZHANG Yin, JIN Xin, et al. A visual method of hydroponic lettuces height and leaves expansion size measurement for intelligent harvesting[J]. Agronomy, 2023, 13: 1996.

[18] 翟肇裕, 张梓涵, 徐焕良, 等. YOLO算法在动植物表型研究中应用综述[J]. 农业机械学报, 2024, 55(11): 1 – 20.
ZHAI Zhaoyu, ZHANG Zihan, XU Huanliang, et al. Review of applying YOLO family algorithms to analyze animal and plant phenotype[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(11): 1 – 20. (in Chinese)

[19] 杨意, 马术涛, 黄灿增, 等. 基于三维点云的群株生菜分割模型与鲜质量预测方法[J]. 农业工程学报, 2025, 41(1): 192 – 199.
YANG Yi, MA Shutao, HUANG Canzeng, et al. Segmenting collective lettuce to predict fresh weight using three-dimensional point cloud[J]. Transactions of the CSAE, 2025, 41(1): 192 – 199. (in Chinese)

[20] 朱逢乐,严霜,孙霖,等. 基于深度学习多源数据融合的生菜表型参数估算方法[J]. 农业工程学报, 2022, 38(9): 195 – 204.
ZHU Fengle, YAN Shuang, SUN Lin, et al. Estimation method of lettuce phenotypic parameters using deep learning multi-source data fusion[J]. Transactions of the CSAE, 2022, 38(9): 195 – 204. (in Chinese)

[21] 张继成, 侯郁硕, 郑萍, 等. 低数据集下基于ASPP – YOLO v5的苋菜识别方法研究[J]. 农业机械学报, 2023, 54(增刊2): 223 – 228.
ZHANG Jicheng, HOU Yushuo, ZHENG Ping, et al. Method for amaranth identification based on ASPP – YOLO v5 model in low data set[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(Supp. 2): 223 – 228. (in Chinese)

[22] JIN Xin, JIAO Haowei, ZHANG Chao, et al. Hydroponic lettuce defective leaves identification based on improved YOLOv5s [J]. Frontiers in Plant Science, 2023, 14(1): 1 – 14.

[23] WU Zhenchao, YANG Ruizhe, GAO Fangfang, et al. Segmentation of abnormal leaves of hydroponic lettuce based on DeepLabV3 + for robotic sorting[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 190(11): 106443.

[24] 陆声链, 李沂杨, 李帼, 等. 基于RGB与深度图像融合的生菜表型特征估算方法[J]. 农业机械学报, 2025, 56(1): 84 – 91, 101.
LU Shenglian, LI Yiyang, LI Guo, et al. Lettuce phenotype estimation using integrated RGB – depth image synergy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2025, 56(1): 84 – 91, 101. (in Chinese)

[25] 宋彦,杨帅,郑子秋,等. 基于多头自注意力机制的茶叶采摘点语义分割算法[J]. 农业机械学报, 2023, 54(9): 297 – 305.
SONG Yan, YANG Shuai, ZHENG Ziqiu, et al. Semantic segmentation algorithm based multi-headed self-attention for teapicking points[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2023, 54(9): 297 – 305. (in Chinese)